第 51 卷 第 11 期 金属学报 Vol.51 No.11
2015 年 11 月 第 1349–1355 页 ACTA METALLURGICA SINICA Nov. 2015 pp.1349–1355

双环电化学动电位再活化法评价 11Cr 铁素体不锈钢晶间腐蚀敏感性*

强少明 [1)] 江来珠 [2)] 李 劲 [1)] 刘天伟 [3)] 吴艳萍 [3)] 蒋益明 [1)]

1) 复旦大学材料科学系, 上海 200433
2) 宝钢有限公司研发中心, 上海 201900
3) 中国工程物理研究院表面物理与化学国家重点实验室, 绵阳 621907

摘 要 利用 TEM, EDS 和 SAED 等分析方法, 研究了 11Cr 铁素体不锈钢 409L 在 600 ℃敏化下析出物特性, 并将双环电化学动电位再活化法(DL-EPR)用于评价 409L 钢的晶间腐蚀敏感性, 通过研究 DL-EPR 的扫描速率、介质成分、介质温度对测试结果的影响, 对该方法进行了优化, 并用该优化法研究了敏化处理对 409L 钢晶间腐蚀敏感性的影响. 结果表明, 敏化的 409L 钢发生晶间腐蚀是由于 $M_{23}C_6$ 沿晶界析出. 在最优化条件下, DL-EPR 法能定量评价 409L 钢的晶间腐蚀敏感性且具有良好的重复性. 随敏化处理时间延长, 沿晶界析出的 $M_{23}C_6$ 增多, 晶间腐蚀敏感性也随之增强.

关键词 11Cr 铁素体不锈钢, 双环电化学动电位再活化法, 晶间腐蚀, $M_{23}C_6$

中图法分类号 TG172.8 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2015)11-1349-07

EVALUATION OF INTERGRANULAR CORROSION SUSCEPTIBILITY OF 11Cr FERRITIC STAINLESS STEEL BY DL-EPR METHOD

QIANG Shaoming [1)], *JIANG Laizhu* [2)], *LI Jin* [1)], *LIU Tianwei* [3)], *WU Yanping* [3)], *JIANG Yiming* [1)]

1) Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433
2) Research and Development Center, Baosteel Co. Ltd., Shanghai 201900
3) National Key Laboratory for Surface Physics and Chemistry Laboratory, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621907

Correspondent: JIANG Yiming, professor, Tel: (021)65643648, E-mail: ymjiang@fudan.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (Nos.51131008 and 51134010), National Key Technology Support Program (No.2012BAE04B00) and Doctoral Fund of Ministry of Education of China (No.20120071110013)

Manuscript received 2015–02–18, in revised form 2015–04–19

ABSTRACT Ferritic stainless steel (FSS) containg (11%~13%)Cr with low C and N has excellent comprehensive performances and thus can be widely applied in extensive fields such as automobile exhaust systems, containers, buses and so on. Among them, 409L steel containing 11%Cr has been increasingly used in applications for tail pipes in the cold end parts of automobile exhaust systems because of its good corrosion resistance and moderate price. During the manufacture process for these tail pipes, improper heat treatments and welding operations cause the precipitation of some detrimental phases such as carbides, nitrides, which leads to a reduction on the resistance to intergranular corrosion (IGC) due to the presence of Cr-depleted zone in the grain boundaries. In this work, the precipitates in grain boundaries of 409L steel aged at 600 ℃ were investigated using TEM, EDS and SAED. The

* 国家自然科学基金项目 51131008 和 511340101, 国家科技支撑课题项目 2012BAE04B00 以及国家教育部博士点专项基金项目 20120071110013 资助
收到初稿日期: 2015–02–18, 收到修改稿日期: 2015–04–19
作者简介: 强少明, 男, 1988 年生, 硕士生
DOI: 10.11900/0412.1961.2015.00117

double loop-electrochemical potentiokinetic reactivation (DL-EPR) method was extended for evaluating the IGC susceptibility of 409L steel. The operating conditions of the DL-EPR test for 409L steel were optimized by investigating the influences of the main test parameters, such as scanning rate, solution composition, solution temperature. The experimental results showed that the IGC occurred in aged 409L steel due to the precipitation of $M_{23}C_6$ along grain boundaries. The optimized DL-EPR test could evaluate the IGC susceptibility of 409L steel quantitatively with high reproducibility. With the increase of aging time, much more $M_{23}C_6$ precipitated along grain boundaries, which resulted in 409L steel more susceptible to IGC.

KEY WORDS 11Cr ferritic stainless steel, double loop-electrochemical potentiokinetic reactivation, intergranular corrosion, $M_{23}C_6$

低铬铁素体不锈钢是指Cr含量在11%~13%的铁素体不锈钢[1~3]. 随着氩氧脱碳法(AOD)和真空吹氧脱碳法(VOD)等技术的应用以及稳定化元素的添加, 低铬铁素体不锈钢中的C, N含量得到极大程度地降低, 从而可显著改善其腐蚀性能、力学性能和焊接性能[4]. 此外, 由于低铬铁素体不锈钢含Cr量少并且不含Ni, 因此其合金成本相对低廉, 被广泛应用于汽车排气系统、货车车皮、容器、管线等领域[5~7]. 其中, 含Cr量为11%的409L铁素体不锈钢由于具有良好的耐蚀性和适中的价格, 近年来被广泛用于制造汽车排气系统冷端的排气尾管[8,9]. 然而, 在排气尾管的制造过程中, 不适当的热处理和焊接过程会使409L钢产生大量析出相, 这些析出相可显著影响其腐蚀性能, 尤其是晶间腐蚀性能. 目前, 研究人员[10~13]对中高铬不锈钢中析出相对其晶间腐蚀性能影响的研究已经较为深入, 但对低铬铁素体不锈钢中析出相对其晶间腐蚀性能影响的研究却非常有限, 尤其是409L钢, 其含C和Cr量均很低, 析出相与中高铬不锈钢中的析出相不同[14,15], 因此, 有必要确定其析出相的类型, 阐明晶间腐蚀的原因, 此外, 需要研究其含量与敏化处理的关系, 从而明确敏化处理对409L钢晶间腐蚀性能的影响, 为其生产制造和推广应用提供理论依据和技术参考.

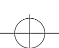
传统的评价不锈钢晶间腐蚀敏感性的方法主要基于文献[14,16,17]提出的测试方法, 适用评价对象是Cr含量在17%~29%的不锈钢[18], 主要缺点是难以定量评价晶间腐蚀敏感性程度、灵敏度低、耗时长和具有破坏性[19~21]. 对低铬铁素体不锈钢而言, 由于以上测试方法所使用的溶液侵蚀性太强, 会发生严重的均匀腐蚀, 因而不适于评价其晶间腐蚀敏感性. 与传统方法相比, 双环电化学动电位再活化法(DL-EPR)能够快速、无损、定量检测不锈钢的晶间腐蚀敏感性, 其原理是利用不锈钢的钝化再活化特性与钝化膜中的主体合金元素的含量及膜的特性有关这一特点, 研究钢的敏化行为. 在钝化状态下, 钝化膜的形态、结构在很大程度上依赖于固溶体中Cr和Mo的含量. 在一定电解质和外加电位作用下, 钢的表面将形成一层完整、致密的钝化膜; 而经敏化的试样因晶界贫Cr, 形成的钝化膜是不完整的[22~25]. 在外加电位回扫到再活化区时, 不完整的钝化膜将优先受到腐蚀, 再活化电流增高, 利用这一性质可判断钢的敏化程度[26]. 陈范才和胡石林[27]将其用于对不锈钢晶间腐蚀进行检测的检测仪的研制, 成功地应用于现场无损检测. DL-EPR法最初应用于检测300系列奥氏体不锈钢的晶间腐蚀敏感性[28,29], 随后Mignone等[30]和Lee[31]通过调整测试参数分别将其成功用于检测高铬合金800和中铬铁素体不锈钢AISI 430和444等的晶间腐蚀敏感性. 但是, 直到1992年才有报道运用DL-EPR法研究低铬铁素体不锈钢晶间腐蚀敏感性[18]. 随着低铬铁素体不锈钢的推广应用, 晶间腐蚀失效事件时有发生, 采用DL-EPR法研究其晶间腐蚀敏感性具有显著实际意义. 目前, 运用DL-EPR法研究汽车排气系统用409L钢的晶间腐蚀敏感性鲜有报道, 该方法的最优化条件也不清楚.

因此, 本工作的宗旨在于确立409L钢DL-EPR测试的最优化条件, 并定性、定量研究409L钢600 ℃敏化后的晶间腐蚀敏感性变化.

1 实验方法

实验材料为11Cr铁素体不锈钢409L, 其化学成分(质量分数, %)为: C 0.011, Cr 11.55, Ni 0.15, Ti 0.23, Nb 0.01, N 0.0063, Fe 余量. 将实验钢切割成尺寸为10 mm×10 mm×1 mm的试样, 在1200 ℃固溶处理1 h后水淬, 然后在600 ℃分别敏化0.5, 4和10 h. 所有热处理均在纯 N_2 中进行. 从样品的非工作面引出导线, 用环氧树脂封装样品, 并暴露测试面积为1 cm^2. 待工作电极封好之后, 用水磨砂纸逐级打磨工作面, 依次用蒸馏水、乙醇、丙酮清洗, 吹干.

利用CHI660B型电化学工作站进行DL-EPR测试, 采用标准的三电极体系, 辅助电极为Pt电极, 参比电极为饱和甘汞电极(SCE), 工作电极为409L钢. 首先将工作电极浸入添加不同质量分数KSCN (硫氰酸



钾, 去极化剂)的 0.5%H_2SO_4, 从自腐蚀电位开始, 以不同的扫描速率进行阳极极化电位扫描, 当钝化电位达到 700 mV 时, 以相同的扫描速率反向扫描至自腐蚀电位, 获得正向扫描活化态最大电流(I_a)和逆向扫描再活化态最大电流(I_r). 采用 I_r/I_a 的比值(R_a)来表征材料的晶间腐蚀敏感性. R_a 越大, 表明材料的晶间腐蚀敏感性越大[32]. 同一敏化态下制取 2 个平行样, 每个平行试样进行 3 次重复实验, 将 2 个平行样所有测试 R_a 的平均值作为该敏化态下的 R_a, 以减小误差; 采用 4XGE 型金相显微镜(OM)观察试样的腐蚀形貌, 以 JEOL-2100F 型透射电镜(TEM)自带能谱仪(EDS)观察热处理前后晶界上成分的变化. 采用 Thermo-Calc 软件热力计算获得 409L 钢的平衡相图.

2 结果与讨论

2.1 热处理析出物

图 1 为 Thermo-Calc 软件模拟计算的 409L 钢平衡态下各物相含量随温度的变化曲线. 可以看出, TiC 在 950 ℃开始分解, 到 1200 ℃时, 分解量达到 25.5%, 而 TiN 则仍然稳定[5]. 因此, 1200 ℃的固溶处理会产生一定量的游离 C 原子, 经水淬后基体中的 C 过饱和. 由于 C 在铁素体不锈钢中的溶解度很低[18,33], 600 ℃敏化处理使过饱和 C 原子向晶界扩散, 与晶界附近的 Cr 结合形成 Cr 的 C 化物.

图 2 为 409L 钢在 600 ℃敏化 4 h 前后的晶界形

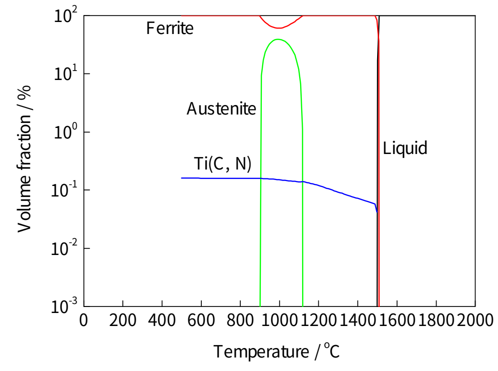


图 1 Thermo-Calc 模拟计算得到的 409L 钢中平衡态的各相含量

Fig.1 Volume fraction of phases in 409L steel calculated by Thermo-Calc

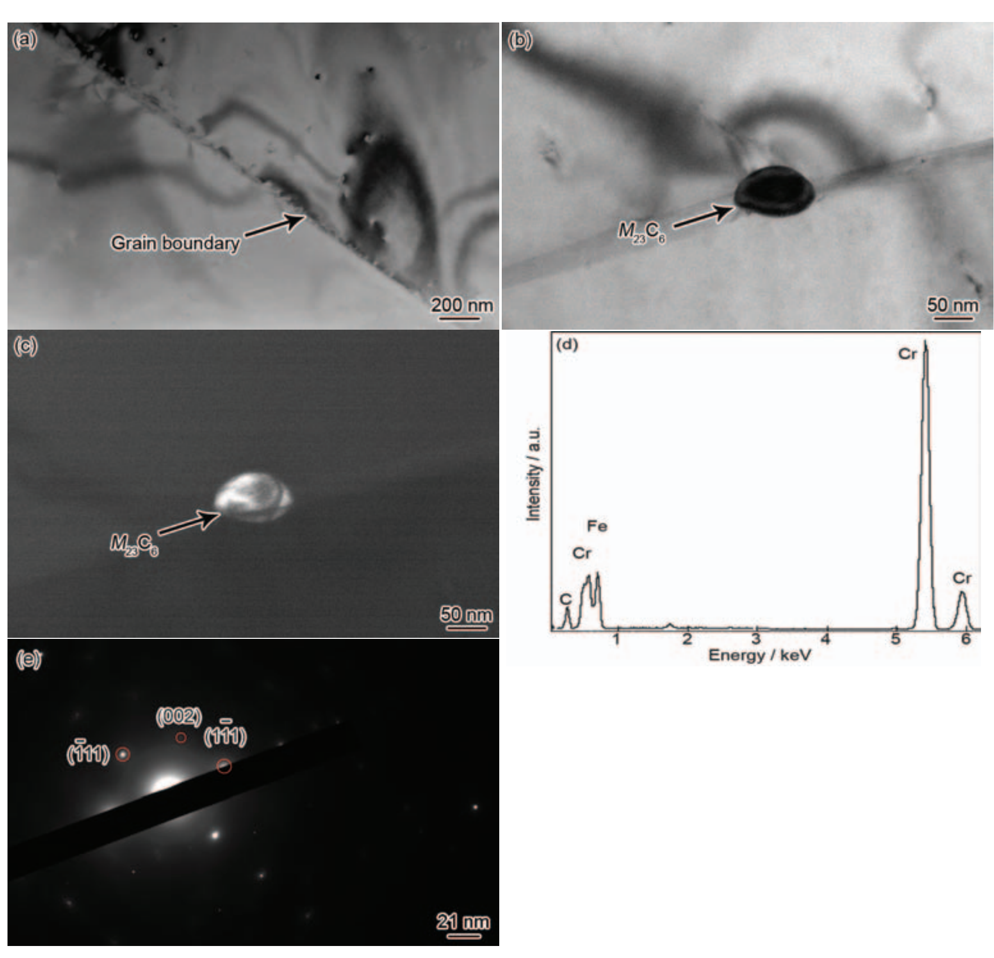


图 2 409L 钢 600 ℃敏化 4 h 前后的晶界形貌的 TEM 像、EDS 分析和 SAED 谱

Fig.2 TEM image of grain boundary in as-received 409L steel (a), bright-field (b) and dark-field (c) images of grain boundaries in 409L steel after aged at 600 ℃ for 4 h, EDS analysis (d) and SAED pattern (e) of carbides

貌、EDS分析和SAED谱. 由图2a可见, 原始409L钢无晶间腐蚀敏感性, 其晶界无析出物. 敏化4 h后(图2b和c), 晶界产生析出物, EDS分析(图2d)表明该析出物为C, Cr, Fe的化合物, 图2e所示的的SAED谱进一步证实该析出物为$M_{23}C_6$. 经600 ℃敏化后, $M_{23}C_6$沿晶界析出并消耗晶界附近大量的Cr, 由于此温度下基体内的Cr无法及时扩散至晶界[18], 结果在晶界附近产生贫Cr区, 形成了以晶粒为阴极、贫Cr区为阳极的活化-钝化短路电偶腐蚀电池, 致使贫Cr区发生严重的阳极溶解, 从而产生晶间腐蚀[14].

2.2 KSCN浓度对DL-EPR测试结果的影响

图3为409L钢在溶液温度为30 ℃, 扫描速率为1.667 mV/s, KSCN的质量分数分别为0.0001%, 0.002%, 0.01%和0.1%的0.5%H_2SO_4溶液中的DL-EPR测试结果. DL-EPR测试对晶间腐蚀敏感性依赖于KSCN的浓度, 低浓度的KSCN不利于晶间腐蚀的显现[18], 浓度太低时, DL-EPR回扫峰不明显, 使得I_r较低, 不同敏化态样品的正扫峰所对应的I_a相差较小, 因此, 当KSCN的浓度为0.0001%时, 各敏化态样品DL-EPR测试所得的R_a区别很小. 当KSCN浓度为0.01%和0.1%时, 无晶间腐蚀敏感性的原始409L钢的R_a分别为3.21%和15.31%, 无法满足DL-EPR测试中有效性要求, 即非敏化材料的R_a必须小于1%[34], 所以这2个浓度不适合作为本工作测试参数. 只有当KSCN浓度为0.002%时, 原始409L钢R_a值小于1%, 且不同敏化态的样品的R_a区别较大, 因此, 为了较好的表征不同敏化态样品的晶间腐蚀敏感性, 最优的KSCN浓度被确定为0.002%.

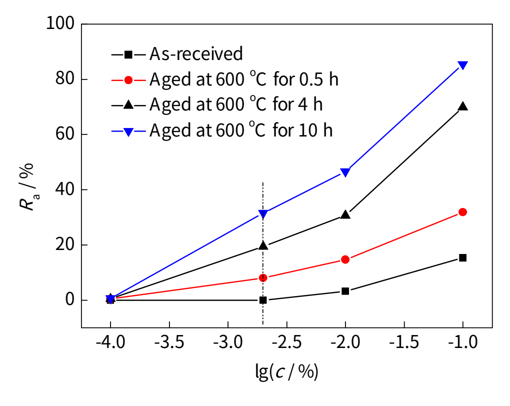


图3 扫描速率为1.667 mV/s时KSCN浓度对409L钢在30 ℃的0.5%H_2SO_4溶液中DL-EPR测试结果的影响

Fig.3 Effects of KSCN concentration (c) on DL-EPR test for 409L steel in 0.5%H_2SO_4 solution with scanning rate 1.667 mV/s at 30 ℃ (R_a—intergranular corrosion sensitivity)

2.3 扫描速率对DL-EPR测试结果的影响

图4为409L钢在30 ℃的0.5%H_2SO_4+0.002% KSCN溶液中, 扫描速率分别为0.5, 1.667, 2.5和5 mV/s时的DL-EPR测试结果. 可以看出, 扫描速率对原始409L钢样品的R_a几乎没有影响, 这是由于其无晶间腐蚀敏感性, 但对敏化样品的R_a影响则非常显著. 随着扫描速率增大, 敏化样品的R_a迅速减小, 当其增至5 mV/s时, 不同敏化态样品的R_a区别很小, 这是由于扫描速率过快时, 回扫过程中贫Cr区的溶解很不充分, 而I_r对应着贫Cr区的溶解, 因而I_r区别很小; 正扫过程中各样品的I_a相差较小, 所以R_a区别很小. 当扫描速率很低时(0.5 mV/s), 虽然R_a区别较大, 但由于样品在介质中浸泡过久, 表面发生了严重的均匀腐蚀, 因此, 0.5 mV/s的扫描速率不适合作为本实验条件的参数. 当扫描速率为1.667 mV/s时, R_a的区别要比2.5 mV/s明显, 因而用DL-EPR法进行测试时, 选择1.667 mV/s较为合适.

2.4 溶液温度对DL-EPR测试结果的影响

图5为扫描速率为1.667 mV/s, 409L钢在0.5%H_2SO_4+ 0.002%KSCN溶液中, 溶液温度分别为20, 25, 30和40 ℃时的DL-EPR测试结果. 可以看出, 溶液温度对原始409L钢样品的R_a影响很小, 但对敏化样品的R_a影响则非常显著, 随着温度增加, R_a增大, 并且不同敏化态样品的R_a差异增大, 但当温度较低时(20和25 ℃), R_a区别较小; 当温度增至40 ℃时, 原始样品R_a为1.01%, 这与DL-EPR测试有效性要求非敏化材料的R_a必须小于1%矛盾. 当温度为30 ℃时, 各敏化态样品R_a区别较大且原始409L钢的R_a小于1%, 所以选择30 ℃作为本工作的

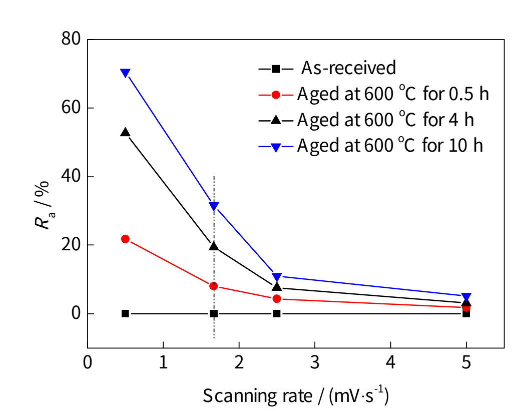


图4 扫描速率对409L钢在30 ℃的0.5%H_2SO_4+0.002%KSCN溶液中DL-EPR测试结果的影响

Fig.4 Effects of scanning rate on DL-EPR test for 409L steel in 0.5%H_2SO_4+0.002%KSCN solution at 30 ℃

测试条件.

由以上讨论可知, 409L 钢 DL-EPR 测试的最优化条件为: 溶液介质为 0.5%H_2SO_4+ 0.002%KSCN, 扫描速率为 1.667 mV/s, 溶液温度为 30 ℃. 在此条件下选择 600 ℃敏化 0.5 和 4 h 的 409L 钢样品进行重复实验, R_a 变化很小, 说明在最优化条件下, DL-EPR 测试具有良好的重复性.

图 6 为在最优化条件下 409L 钢的 DL-EPR 测试曲线. 可以看出, 409L 钢的 DL-EPR 曲线存在较长的钝化区(–0.3~0.7 V), 钝化电流均趋近于 0, 而正向扫描活化态最大电流(I_a)则均在 10^{-2} A/cm² 量级, 表现为与材料的晶间腐蚀敏感性无关. 对于逆向扫描再活化态最大电流(I_r)而言, 原始态和敏化态的样品存在着巨大的差异, 前者显著低于后者, 原因是原始态的样品在晶界处基本不存在贫 Cr 区, 而敏化处理的样品在晶界处有明显的贫 Cr 区, 并且在晶界形成的钝化膜极不稳定, 在电压逆向扫描过程中会破裂, 导致敏化处理样品的 I_r 较高. 表 1 给出了 409L 钢在 600 ℃敏化不同时间后在最优化条件下的 DL-EPR 测试结果. 可见, 随敏化时间延长, R_a 增大, 表明晶间腐蚀敏感性增强, 这是由于随敏化时间延长, $M_{23}C_6$ 在晶界上析出量增多, 导致晶界附近的贫 Cr 区变多且宽度增加, 因而晶间腐蚀敏感性增强, 在 DL-EPR 测试时回扫峰则升高, 对应的 I_r 增大, 而正扫时 I_a 较接近, 因而 R_a 增大.

图 7 为在最优化条件下 409L 钢 DL-EPR 测试后的 OM 像. 由图 7a 可知, 原始 409L 钢表面没有发生晶间腐蚀, 表明不存在贫 Cr 区, 说明其晶界上无富 Cr 的碳化物析出, 这与从图 2a 观察到的结果具有一致性, 说明在最优条件下用 DL-EPR 法评价 409L 钢的晶间腐蚀敏感性具有可靠性. 从图 7b~d 可以看出, 经固溶处理(1200 ℃)的 409L 钢晶粒显著增大, 达到 100 μm 的量级, 这会导致其晶间腐蚀敏感性增强. 此外, 600 ℃的敏化处理会使其晶界上有 $M_{23}C_6$ 析出, 随敏化时间延长, $M_{23}C_6$ 在晶界上析出量增多, 导致晶界附近的贫 Cr 区变多且宽度增加, 因而晶间腐蚀形貌加重, 与表 1 所示的 R_a 的变化一致, 进一步说明在最优化条件下的 DL-EPR 测试可以定量评价 409L 钢的晶间腐蚀敏感性.

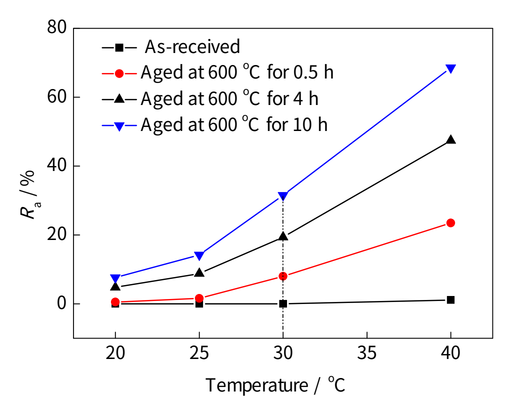


图 5 扫描速率为 1.667 mV/s 时溶液温度对 409L 钢在 0.5%H_2SO_4+0.002%KSCN 溶液中 DL-EPR 测试结果的影响

Fig.5 Effects of solution temperatures on DL-EPR test for 409L steel in 0.5% H_2SO_4 + 0.002% KSCN solution with scanning rate 1.667 mV/s

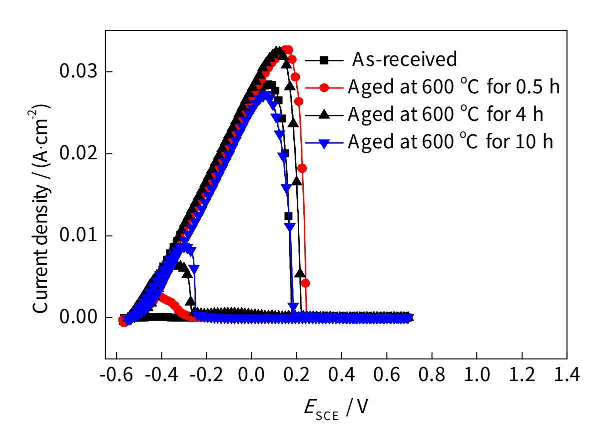


图 6 在最优化条件下 409L 钢在 600 ℃敏化不同时间后的 DL-EPR 曲线

Fig.6 DL-EPR curves at the optimal conditions for 409L steel aged at 600 ℃ for different times (E_{SCE}—potential)

表 1 409L 钢在 600 ℃敏化不同时间后在最优化条件下的 DL-EPR 测试结果

Table 1 DL-EPR results for 409L steel aged at 600 ℃ for different times at the optimal conditions

Sample	I_a / (mA·cm^{-2})	I_r / (mA·cm^{-2})	R_a / %
As-received	28.40	0	0
Aged for 0.5 h	32.61	2.61	8.00
Aged for 4 h	32.40	6.29	19.41
Aged for 10 h	27.18	8.63	31.75

Note: I_a—maximum current density in the anodic scan, I_r—maximum current density in the reverse scan

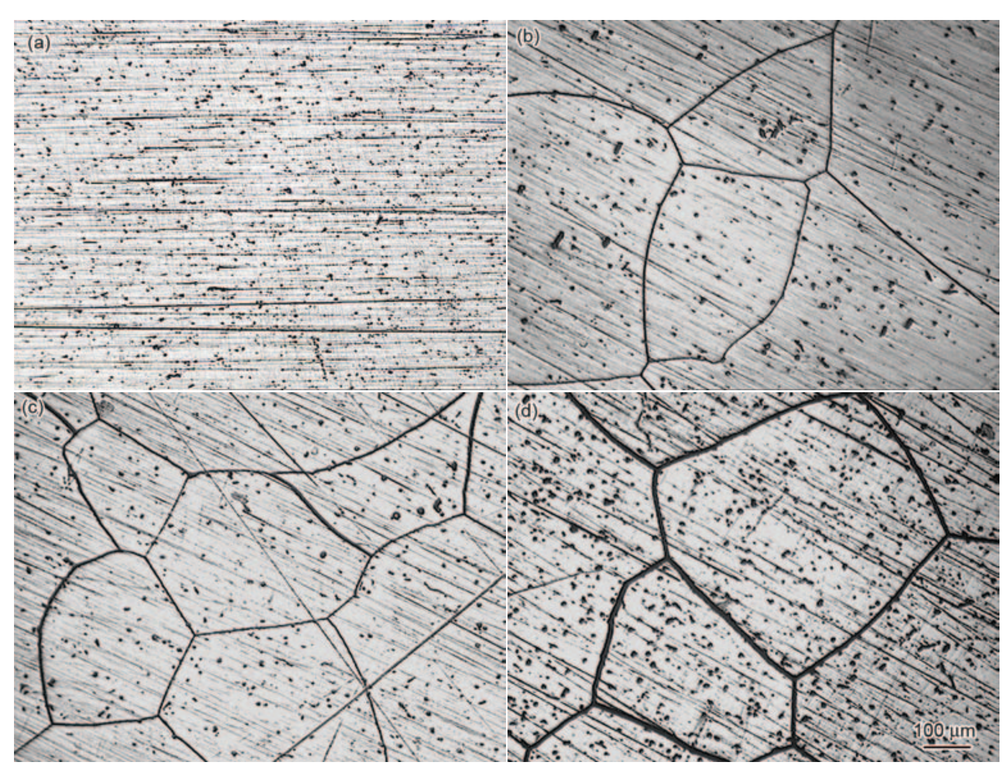


图7 最优化条件下下409L钢DL-EPR测试后的OM像

Fig.7 OM images of 409L steel after DL-EPR test at the optimal conditions

(a) as-received (b) aged at 600 ℃ for 0.5 h (c) aged at 600 ℃ for 4 h (d) aged at 600 ℃ for 10 h

3 结论

(1) 409L钢在1200 ℃固溶, 在600 ℃敏化后发生晶间腐蚀的原因是$M_{23}C_6$相沿晶界析出.

(2) 评价409L钢晶间腐蚀敏感性的DL-EPR测试最优化条件为: 溶液介质0.5%H_2SO_4+0.002%KSCN, 溶液温度30 ℃, 扫描速率1.667 mV/s. 在此条件下进行DL-EPR测试可以定量评价其晶间腐蚀敏感性且具有良好的重复性.

(3) 随敏化时间延长, 沿晶界析出的$M_{23}C_6$增多, 晶间腐蚀敏感性也随之增强.

参考文献

[1] Pardo A, Merion M C, Coy A E, Viejo F, Carboneras M, Arrabal R. *Acta Mater*, 2007; 55: 2239

[2] Nichol T J, Davis J A. *Intergranular Corros Stainless Alloy*, 1978; 656: 179

[3] Devine T M, Drummond B J. *Corrosion*, 1982; 38: 327

[4] You X M, Jiang Z H, Li H B, Shen M H, Cao Y. *Chin Metall*, 2007; (11): 16
(游香米, 姜周华, 李花兵, 申明辉, 曹 阳. 中国冶金, 2007; (11): 16)

[5] Gate J D, Jago R A. *Mater Sci Technol*, 1987; 3: 450

[6] Fritz J D, Franson I A. *Mater Perform*, 1997; 36(8): 57

[7] Lakshminarayanan A K, Balasubramanian V. *Mater Des*, 2010; 31: 4592

[8] Kim J K, Lee B J, Lee B H, Kim Y H, Kim K Y. *Scr Mater*, 2009; 61: 1133

[9] Kim J K, Kim Y H, Lee J S, Kim K Y. *Corros Sci*, 2010; 52: 1847

[10] Warren D. *Corrosion*, 1959; 15(4): 63

[11] Guarnieri G J, Miller J, Vawter F J. *Trans ASM*, 1950; 42: 981

[12] Pohl M, Storz O, Glogowski T. *Mater Charact*, 2007; 58: 65

[13] Tseng C C, Shen Y, Thompson S W, Mataya M C, Krauss G. *Metall Mater Trans*, 1994; 25A: 1147

[14] Xiao J M. *Metallography Issues of Stainless Steels*. 2nd Ed., Beijing: Metallurgy Industry Press, 2006: 39; 166; 171
(肖纪美. 不锈钢的金属学问题. 第二版, 北京: 冶金工业出版社, 2006: 39; 166; 171)

[15] Gui L F, Wu M D, Zhao Y. *Handbook of Materials Testing for Mechanical Engineering*. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2002: 158
(桂立丰, 吴民达, 赵 源. 机械工程材料测试手册. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002: 158)

[16] Huey W R. *Trans Am Soc Steel Treat*, 1930; 18: 1126

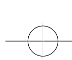
[17] Streicher M A. *Corros Sci*, 1969; 9: 53

[18] Frangini S, Mignone A. *Corrosion*, 1992; 48: 75

[19] Gong J, Jiang Y M, Deng B, Xu J L, Hu J P, Li J. *Electrochim Acta*, 2010; 55: 5077

[20] Deng B, Jiang Y M, Xu J L, Sun T, Gao J, Zhang L H, Zhang W, Li J. *Corros Sci*, 2010; 52: 969

[21] Gao J, Jiang Y M, Deng B, Zhang W, Zhong C, Li J. *Corros Sci*, 2009; 54: 5830



[22] Zhong C, Liu F, Wu Y T, Le J J, Liu L, He M F, Zhu J C, Hu W B. *J Alloys Compd*, 2012; 520: 11

[23] Le J J, Liu L, Liu F, Deng Y D, Zhong C, Hu W B. *J Alloys Compd*, 2014; 610: 173

[24] Zhong C, He M F, Liu L, Wu Y T, Chen Y J, Deng Y D, Shen B, Hu W B. *J Alloys Compd*, 2010; 504: 377

[25] Zhong C, He M F, Liu L, Chen Y J, Shen B, Wu Y T, Deng Y D, Hu W B. *Surf Coat Technol*, 2010; 205: 2412

[26] Jin W S, Lang Y P, Rong F, Sun L J. *J Chin Soc Corros Prot*, 2007; 27: 54
(金维松, 郎宇平, 荣 凡, 孙力军. 中国腐蚀与防护学报, 2007; 27: 54)

[27] Chen F C, Hu S L. *Comput Appl Chem*, 2001; 18: 433
(陈范才, 胡石林. 计算机与应用化学, 2001; 18: 433)

[28] Clarke W L, Cowan R L, Wakler W L. *Intergranular Corros Stainless Alloy*, 1978; 656: 99

[29] Cihal V. *Corros Sci*, 1980; 20: 737

[30] Mignone A, Borello A, Barbera A L. *Corrosion*, 1982; 38: 390

[31] Lee J B. *Corrosion*, 1986; 42: 106

[32] Li S S. *Corros Sci Technol Prot*, 2000; 12: 288
(李神速. 腐蚀科学与防护技术, 2000; 12: 288)

[33] Kim J K, Kim Y H, Uhm S H, Lee J S, Kim K Y. *Corros Sci*, 2009; 51: 2716

[34] Amadou T, Braham C, Sidhom H. *Metall Mater Trans*, 2004; 35A: 3513

(责任编辑:罗艳芬)

